

JAPAN PATENT OFFICE

(11)Publication number: 11-266055

(43)Date of publication of application: 28.09.1999

(51)Int. Cl. H01S 3/18

(21)Application number: 10-68488

(22)Date of filing: 18.03.1998

(71)Applicant: ION KOGAKU KENKYUSHO:KK

(72)Inventor: KAJIYAMA KENJI

[0033] FIGS. 2 and 3 are schematic process section views showing a method of manufacturing a semiconductor laser element in a first embodiment of the present invention.

[0034] First, as illustrated in FIG. 2(a), a silicon oxide layer 2a is formed on a Si substrate 1 through a scheme, such as heat oxidation, CVD (chemical-vapor deposition), or sputtering.

[0035] Next, as illustrated in FIG. 2(b), Ge is introduced through ion injection to a silicon oxide layer 2a so as to be supersaturated therein, with energy so that Ge has a maximum concentration at a depth half of the thickness of the silicon oxide layer 2a, thereby forming a Ge supersaturated layer 3a having a film thickness of several tens of nanometers. Conditions for ion injection are set so that, for example, acceleration energy of Ge ions is several tens to several of keV, and that the amount of dose is  $10^{15}$ - $10^{17}$  cm<sup>-2</sup>. In this case, the concentration of Ge in the Ge supersaturated layer 3a is several atom % to several tens of atom %.

[0036] Next, as illustrated in FIG. 2(c), the silicon oxide layer 2a is irradiated with short-wavelength coherent light beams L1 and L2, such as excimer laser light beams, free-electron laser light beams, or radiated light beams, that are branched from the same light source in two directions having an angle  $\theta_1$ , thereby forming coherent fringes. Also, by irradiating similar coherent light beams from two directions having an angle  $\theta_2$  (not shown), coherent fringes having an angle  $\theta_3$  (not shown) with respect to

the above-mentioned coherent fringes are formed, thereby forming crossing, lattice-shaped coherence fringes on the silicon oxide layer 2a at an interval of a space wavelength equal to a light-emission wavelength in that silicon oxide. Thus, Ge dots 4 each having the magnitude of several nanometers to several tens of nanometers are precipitated through photoexcitation at a depth where the Ge concentration is maximum at an intensity peak position of each intersection of those coherence fringes.

[0037] Note that the optical wavelength in silicon oxide has a value obtained by dividing the optical wavelength in vacuum by 1.46, which is the refractive index of silicon oxide. Therefore, the wavelength of coherent light in silicon oxide has a value obtained by dividing the wavelength of coherent light in vacuum by 1.46, which is the refractive index of silicon oxide. In this case, the angles  $\theta_1$  and  $\theta_2$  formed by the coherent light beams L1 and L2 in the two directions and the wavelengths of those coherent light beams L1 and L2 are selected so that array periods d1 and d2 of the Ge dots 4 are equal to the light-emission wavelength in silicon oxide. Note that the array periods d1 and d2 are periods in a direction in which the dots intersect on a plane parallel to the surface of the Si substrate 1. In the drawing, only the array period d1 is shown.

[0038] For example, when laser-emitted light in vacuum is green light of  $0.52\mu\text{m}$ , the wavelength of the laser light in silicon oxide is purple light of  $0.39\mu\text{m}$ . To form coherent fringes having

a period of 0.39  $\mu\text{m}$ , purple light having a wavelength shorter than the above is used as coherent light. Also, in order to prevent precipitation at locations other than the intersections of the coherent fringes, incident light is instantaneously excited as in a pulse-like shape. In this way, the plurality of Ge dots 4 are formed in the Ge supersaturated layer 3a in a two-dimensional lattice shape.

[0039]        Thereafter, as illustrated in FIG. 3(d), the silicon oxide layer 2a is deposited thereon with a transparent electrode layer 4b made of indium oxide, tin, or the like through a scheme, such as sputtering, CVD, or spraying. Next, formed on this transparent electrode layer 4b is a silicon oxide layer 2b having a film thickness of several tens of nanometers. Furthermore, as illustrated in FIG. 3(e), in a process similar to that illustrated in FIG. 2(c), a Ge supersaturated layer 3b having a film thickness of several tens of nanometers is formed in the silicon oxide layer 2b. Formed in the Ge supersaturated layer 3b are a plurality of Ge dots 4 in a two-dimensional lattice shape.

[0040]        Similarly, as illustrated in FIG. 3(f), the silicon oxide layer 2b is deposited thereon with a transparent electrode layer 4c. Formed on the transparent electrode layer 4c is a silicon oxide layer 2c having a film thickness of several tens of nanometers. Formed in the silicon oxide layer 2b is a Ge supersaturated layer 3c having a film thickness of several tens of nanometers. Formed in the Ge supersaturated layer 3c are a plurality of Ge dots 4

in a two-dimensional lattice shape.

[0041] In this case, the film thickness of each of the silicon oxide layers 2a, 2b, and 2c and the transparent electrode layers 4a, 4b, and 4c is set so that an array period  $d_3$  in the vertical direction of the Ge dots 4 in the plurality of Ge supersaturated layers 3a, 3b, and 3c is equal to a light-emission wavelength in a multilayer film composed of the silicon oxide layers 2a, 2b, and 2c and the transparent electrode layers 4a, 4b, and 4c. In this way, the Ge dots 4 are arranged in a three-dimensional lattice shape to form a three-dimensional photonic crystal.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-266055

(43) 公開日 平成11年(1999) 9月28日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

H01S 3/18

識別記号

F I

H01S 3/18

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平10-68488

(22) 出願日 平成10年(1998) 3月18日

(71) 出願人 592054683

株式会社イオン工学研究所

大阪府枚方市津田山手2丁目8番1号

(72) 発明者 梶山 健二

大阪府枚方市津田山手2-8-1 株式会

社イオン工学研究所内

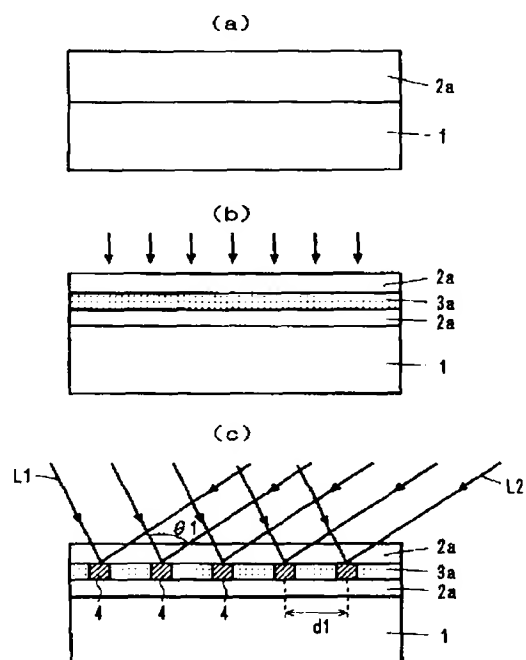
(74) 代理人 弁理士 福島 祥人

(54) 【発明の名称】 半導体発光素子およびその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 間接遷移型半導体材料によりレーザ発振を行うことができる半導体発光素子およびその製造方法を提供することである。

【解決手段】 Si基板1上に酸化シリコン層2aを形成し、酸化シリコン層2a中にGeのイオン注入によりGe過飽和層3aを形成する。Ge過飽和層3aに可干渉光を2方向から照射するとともに、上記2方向を含む面に垂直な面内で可干渉光を2方向から照射し、酸化シリコン中での発光波長と等しい空間波長の直交する格子状の干渉縞を形成し、直交する干渉縞の交点の強度ピーク位置に光励起により十数nmの大きさのGeドット4を析出させる。同様にして、Geドット4を含む酸化シリコン層を順に積層することにより、複数のGeドット4からなる3次元のフォトニック結晶を構成する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 量子サイズを有する複数の半導体ドットがフォトニック結晶を構成するように周期的に配列されたことを特徴とする半導体発光素子。

【請求項2】 前記複数の半導体ドットは半導体または絶縁体からなる媒体層中に周期的に形成され、前記媒体層の両面が半導体または導体からなる電極で挟まれたことを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項3】 前記媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で前記複数の半導体ドットが前記媒体層中での発光波長に等しい周期で前記媒体層中に配列され、前記媒体層の中央部の領域での前記半導体ドットの配列周期が周囲の領域での前記半導体ドットの配列周期と異なることを特徴とする請求項2記載の半導体発光素子。

【請求項4】 前記複数の半導体ドットは半導体または絶縁体からなる複数の媒体層中に周期的に形成され、前記複数の媒体層は半導体または導体からなる電極層を介して積層されたことを特徴とする請求項1記載の半導体発光素子。

【請求項5】 前記積層された複数の媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で前記複数の半導体ドットが前記媒体層中での発光波長に等しい周期で前記複数の媒体層中に配列されかつ前記複数の媒体層が前記媒体層中での発光波長に等しい周期で積層され、前記積層された複数の媒体層の中央部の領域での前記半導体ドットの配列周期および前記媒体層の積層周期が周囲の領域での前記半導体ドットの配列周期および前記媒体層の積層周期と異なることを特徴とする請求項4記載の半導体発光素子。

【請求項6】 各半導体ドットは複数の微粒子の集合体であることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項7】 半導体または導体からなる電極基板上に半導体または絶縁体からなる媒体層を形成し、前記媒体層中に量子サイズを有する複数の半導体ドットをフォトニック結晶が構成されるように周期的に形成し、前記媒体層上に半導体または導体からなる電極層を形成することを特徴とする半導体発光素子の製造方法。

【請求項8】 前記媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で前記媒体層中での発光波長に等しい周期で前記複数の半導体ドットを配列することを特徴とする請求項7記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項9】 前記媒体層の形成、前記複数の半導体ドットの形成および前記電極層の形成を交互に繰り返し行うことを特徴とする請求項7記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項10】 前記積層された複数の媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で前記媒体層中での発光波長に等しい周期で前記複数の半導体ドットを配列しかつ前記媒体層中での発光波長に等しい周期で前記複数の媒体層を積層することを特徴とする請求項9記載の半導体発光

素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体発光素子およびその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】一般に、発光ダイオード、半導体レーザー素子等の半導体発光素子は、GaAs、GaN等の直接遷移型の化合物半導体材料により形成されている。しかし、これらの化合物半導体材料の中には、有害性を有する元素や、埋蔵量の少ない元素が含まれており、環境や資源の点から課題が生じつつある。

【0003】一方、シリコン(Si)、炭化シリコン(SiC)やゲルマニウム(Ge)は、無害であり、しかもSi、Cは埋蔵量が豊富であるため、種々の半導体素子に用いられているが、間接遷移型半導体であるため、発光ダイオード、半導体レーザー素子等の半導体発光素子への応用は困難であると考えられていた。

【0004】しかし、最近、Si、SiCまたはGeの微粒子からなる活性層を有する高効率可視の発光素子が報告されている。この発光素子では、Si、SiCまたはGeの微粒子の量子効果および表面効果により発光が可能になっているものと考えられる。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記の無秩序に分散したSi、SiCまたはGeの微粒子を用いた発光素子では、レーザー発振は行われない。そこで、間接遷移型半導体材料を用いてレーザー発振が可能な半導体発光素子を実現することが望まれている。

【0006】本発明の目的は、間接遷移型半導体材料によりレーザー発振を行うことができる半導体発光素子およびその製造方法を提供することである。

【0007】

【課題を解決するための手段および発明の効果】本発明に係る半導体発光素子は、量子サイズを有する複数の半導体ドットがフォトニック結晶を構成するように周期的に配列されたものである。各半導体ドットは複数の微粒子の集合体であってもよい。

【0008】量子サイズとは、量子効果が発生する寸法であり、数nm(ナノメートル)から数十nmの寸法である。

【0009】この半導体発光素子においては、各半導体ドットが量子サイズを有するので、発光効率の高い量子準位または界面準位が形成される。それにより、量子準位または界面準位間での注入キャリア(電子および正孔)の遷移により光が放出される。

【0010】また、複数の半導体ドットが媒体層中に周期的に配列されているので、短距離(数周期)においては、各半導体ドットの発光が互いに干渉し、それにより遷移確率が向上する。さらに、長距離においては、フォ

トニック結晶を構成するので、半導体ドットの配列周期と等しい波長でのみ光が透過せずに光の反射が生じて共振器が形成される。これらの結果、半導体ドットの発光波長のうちで、半導体ドットの配列周期に対応する特定波長のレーザ発振が可能となる。しかも、バルク結晶で間接遷移型となる半導体材料により半導体ドットを形成した場合でも、レーザ発振が行われる。

【0011】複数の半導体ドットは半導体または絶縁体からなる媒体層中に周期的に形成され、媒体層の両面が半導体または導体からなる電極で挟まれてもよい。媒体層の材料としては発光波長の吸収が少ない半導体または絶縁体を用い、媒体層の両面を電気伝導度の高い半導体または導体からなる電極で挟むことが好ましい。

【0012】この場合、媒体層中に複数の半導体ドットが2次元的に一定の周期で配列されるので、電極を介して複数の半導体ドットにキャリアを注入することにより、媒体層の表面に平行な方向にレーザ光が出射される。

【0013】また、媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で複数の半導体ドットが媒体層中での発光波長に等しい周期で媒体層中に配列され、媒体層の中央部の領域での半導体ドットの配列周期が周囲の領域での半導体ドットの配列周期と異なってもよい。

【0014】このように、媒体層の中央部の領域で半導体ドットの周期性をずらせることにより、発生した光が中央部の領域では透過し、周囲の領域では透過せずに反射する。その結果、反射鏡を設けることなく特定波長のレーザ発振が可能となる。

【0015】複数の半導体ドットが半導体または絶縁体からなる複数の媒体層中に周期的に形成され、複数の媒体層は半導体または導体からなる電極層を介して積層されてもよい。特に、複数の媒体層間に半導体ドットの周期性を損なわないように電極層を挿入することが好ましい。

【0016】この場合、複数の半導体ドットが各媒体層中に2次元的に一定の周期で配列されるとともに積層方向にも一定の周期で配列されるので、電極層を介して複数の半導体ドットにキャリアを注入することにより、媒体層の表面に平行な方向および媒体層の積層方向にレーザ光が出射される。

【0017】また、積層された複数の媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で複数の半導体ドットが媒体層中での発光波長に等しい周期で複数の媒体層中に配列されかつ複数の媒体層が媒体層中での発光波長に等しい周期で積層され、積層された複数の媒体層の中央部の領域での半導体ドットの配列周期および媒体層の積層周期が周囲の領域での半導体ドットの配列周期および媒体層の積層周期と異なってもよい。

【0018】このように、積層された複数の媒体層の中央部の領域で半導体ドットの周期性をずらせることによ

り、発生した光が中央部の領域では透過し、周囲の領域では透過せずに反射する。その結果、反射鏡を設けることなく特定波長のレーザ発振が可能となる。

【0019】本発明に係る半導体発光素子の製造方法は、半導体または導体からなる電極基板上に半導体または絶縁体からなる媒体層を形成し、媒体層中に量子サイズを有する複数の半導体ドットをフォトニック結晶が構成されるように周期的に形成し、媒体層上に半導体または導体からなる電極層を形成するものである。

【0020】本発明に係る半導体発光素子の製造方法によれば、量子サイズを有する複数の半導体ドットが周期的に配列されたフォトニック結晶が得られる。それにより、各半導体ドットの量子効果および複数の半導体ドットからなるフォトニック結晶によりレーザ発振が可能となる。

【0021】特に、媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で媒体層中での発光波長に等しい周期で複数の半導体ドットを配列してもよい。

【0022】このように、媒体層の中央部の領域で半導体ドットの配列性をずらせることにより、発生した光が中央部の領域では透過し、周囲の領域では透過せずに反射する。その結果、反射鏡を設けることなく特定波長のレーザ発振が可能となる。

【0023】媒体層の形成、複数の半導体ドットの形成および電極層の形成を交互に繰り返して行ってもよい。これにより、複数の半導体ドットが媒体層中に2次元的に一定の周期で配列されるとともに積層方向にも一定の周期で配列され、3次元のフォトニック結晶が構成される。その結果、3次元的方向にレーザ光を出射することができる。

【0024】特に、積層された複数の媒体層の中央部の領域を除く周囲の領域で媒体層中での発光波長に等しい周期で複数の半導体ドットを配列しかつ媒体層中での発光波長に等しい周期で複数の媒体層を積層してもよい。

【0025】このように、積層された複数の媒体層の中央部の領域で半導体ドットの周期性をずらせることにより、発生した光が中央部の領域では透過し、周囲の領域では透過せずに反射する。その結果、反射鏡を設けることなく特定波長のレーザ発振が可能となる。

【0026】

【発明の実施の形態】図1は本発明に係る半導体発光素子の一例を示し、(a)は半導体発光素子の模式的縦断面図、(b)は半導体発光素子の模式的横断面図、(c)は1つの半導体ドットの模式的断面図である。

【0027】図1(a)に示すように、複数の媒体層100が一定周期で積層されている。媒体層100は、発光波長の吸収が少ない半導体または絶縁体により形成される。また、図1(b)に示すように、各媒体層100中に複数の半導体ドット101が2次元的に一定の周期で配列されている。図1の例では、各半導体ドット10



1は六方格子の格子点に配列されている。

【0028】各半導体ドット101は数nmから数十nmの寸法を有し、図1(c)に示すように、1つの半導体ドット101は数nmから数十nm程度の大きさの複数の微粒子110の集合体からなる。

【0029】積層された複数の媒体層100の中央部の領域200を除く周囲の領域では、媒体層100中での発光波長に等しい周期で複数の半導体ドット101が配列され、媒体層100中での発光波長に等しい周期で複数の媒体層100が積層されている。すなわち、複数の媒体層100の中央部の領域200での半導体ドット101の配列周期および媒体層100の積層周期は周囲の領域での半導体ドット101の配列周期および媒体層100の積層周期と異なる。

【0030】積層された複数の媒体層101の上面および下面にはそれぞれ電極102、103が設けられている。これらの電極102、103を介して媒体層100中の半導体ドット101に電子・正孔キャリアが注入される。

【0031】この半導体発光素子の製造の際には、中央部の領域200および周囲の領域をマスクを用いて別々の工程で形成する。

【0032】以下、本発明に係る半導体発光素子の一例として半導体レーザ素子の製造方法について説明する。以下の説明では、図1の中央部の領域200を除く周囲の領域の製造方法を示している。中央部の領域200の製造方法は、半導体ドット101の配列周期および媒体層1の積層周期を除いて周囲の領域の製造方法と同様である。

【0033】図2および図3は本発明の第1の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0034】まず、図2(a)に示すように、Si基板1上に、熱酸化法、CVD法(化学的気相成長法)、スパッタリング法等により膜厚数十nmの酸化シリコン層2aを形成する。

【0035】次に、図2(b)に示すように、酸化シリコン層2a中に、イオン注入によりGeを酸化シリコン層2aの厚さの半分の深さで最大濃度となるようなエネルギーで過飽和に導入し、膜厚数十nmのGe過飽和層3aを形成する。イオン注入の条件としては、例えばGeイオンの加速エネルギーを数十〜数千keVとし、ドーズ量を $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ とする。この場合、Ge過飽和層3a中のGeの濃度は数原子%〜数十原子%となる。

【0036】次に、図2(c)に示すように、酸化シリコン層2aに、エキシマレーザ光、自由電子レーザ光、放射光等の同一光源から分岐した短い波長の可干渉光L1、L2を2方向から互いに角度 $\theta_1$ をなすように照射して干渉縞を形成するとともに、上記干渉縞と角度 $\theta_3$

(図示せず)をなすような干渉縞を同様の可干渉光を2方向から互いに角度 $\theta_2$ (図示せず)をなすように照射して形成し、酸化シリコン層2aに酸化シリコン中での発光波長と等しい空間波長の間隔の互いに交わる格子状の干渉縞を形成する。それにより、互いに交わる干渉縞の交点の強度ピーク位置におけるGe過飽和層3aのGe濃度が最大となる深さに数nm〜数十nmの大きさを有するGeドット4が光励起により析出する。

【0037】なお、酸化シリコン中の光の波長は真空中での光の波長を酸化シリコンの屈折率1.46で除した値となるので、酸化シリコン中の可干渉光の波長は真空中での可干渉光の波長を酸化シリコンの屈折率1.46で除した値となる。この場合、2方向の可干渉光L1、L2がなす角度 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ および可干渉光L1、L2の波長は、Geドット4の配列周期d1、d2が酸化シリコン中での発光波長と等しくなるように選択する。なお、配列周期d1、d2は、Si基板1の表面に平行な面内で互いに交わる方向における周期であり、図には配列周期d1のみが示される。

【0038】例えば、真空中でのレーザ発光を $0.52 \mu\text{m}$ の緑色光とすると、酸化シリコン中でのレーザ光の波長は $0.39 \mu\text{m}$ の紫色光となり、 $0.39 \mu\text{m}$ 周期の干渉縞を形成するためには、これより短い波長の紫外光を可干渉光として用いる。また、干渉縞の交点以外の場所で析出が起こらないように、入射光はパルス状として瞬間的に励起する。このようにして、Ge過飽和層3a中に2次元格子状に複数のGeドット4が形成される。

【0039】その後、図3(d)に示すように、酸化シリコン層2a上に、スパッタリング法、CVD法、スプレー法等により酸化インジウム・スズ等の透明電極層4bを堆積する。次に、この透明電極層4b上に膜厚数十nmの酸化シリコン層2bを形成する。さらに、図3(e)に示すように、図2(c)の工程と同様にして、酸化シリコン層2b中に膜厚数十nmのGe過飽和層3bを形成し、Ge過飽和層3b中に複数のGeドット4を2次元格子状に形成する。

【0040】同様にして、図3(f)に示すように、酸化シリコン層2b上に透明電極層4cを堆積し、透明電極層4c上に膜厚数十nmの酸化シリコン層2cを形成し、酸化シリコン層2c中に膜厚数十nmのGe過飽和層3cを形成し、Ge過飽和層3c中に複数のGeドット4を2次元格子状に形成する。

【0041】この場合、複数のGe過飽和層3a、3b、3c中のGeドット4の上下方向の配列周期d3が酸化シリコン層2a、2b、2cおよび透明電極層4a、4b、4cからなる多層膜中での発光波長と等しくなるように酸化シリコン層2a、2b、2cおよび透明電極層4a、4b、4cの膜厚を設定する。このようにして、複数のGeドット4が3次元格子状に配列され、

3次元のフォトニック結晶が構成される。

【0042】最後に、酸化シリコン層2c上に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法、CVD法等によりAu、Al、酸化インジウム・スズ等からなる電極5を形成するとともに、Si基板1の下面に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法、CVD法等によりAu、Al等からなる電極6を形成する。

【0043】本実施例の半導体レーザ素子において、電極5、6からSi基板1および酸化シリコン層2a、2b、2cに電流を注入すると、複数のGeドット4に電子・正孔キャリアが注入される。各Geドット4は数nmの寸法を有するので、量子効果による量子準位あるいは酸化シリコン層との界面準位が形成され、量子準位あるいは界面準位間での注入キャリアの遷移について近距離のGeドット間の相互作用により高効率で光が放出される。また、複数のGeドット4によりフォトニック結晶が構成されるので、複数のGeドット4の配列周期と等しい波長でのみ光の干渉が起こり、発光の位相が揃ってレーザ発振が行われる。

【0044】なお、本実施例の半導体レーザ素子では、互いに直交する3方向にレーザ光が出射するが、3方向のうち1方向または2方向におけるGeドット4の配列周期をずらせることにより、1方向または2方向のみレーザ光を出射させることができる。

【0045】また、図2および図3の例では、Geドット4を含むGe過飽和層3a、3b、3cが上下方向に3層に積層されているが、積層の数はこれに限定されない。上下方向においても発光の位相を十分に揃えるためには、上下方向の積層の数を5〜10以上にすることが好ましい。

【0046】Geドット4を含むGe過飽和層3aを1層のみ設けた場合には、そのGe過飽和層3aの表面に平行な方向にレーザ光が出射される。

【0047】上記では、Geの過飽和層を形成して可干渉光の干渉縞の照射によりGeドットを周期構造に析出させているが、上記のGeの代わりに、Si、Cあるいはそれらを混合したSi-C-Geの過飽和層を形成して可干渉光の干渉縞の照射によりSi、SiCあるいはSi-C-Geドットを、同様にして周期構造に析出させてもよい。

【0048】図4、図5および図6は本発明の第2の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0049】まず、図4(a)に示すように、Si基板21上に、熱酸化法、CVD法(化学的気相成長法)、スパッタリング法等により膜厚数百nmの酸化シリコン膜22aを形成する。

【0050】その後、図4(b)に示すように、ハロゲン系ガス等のエッチング性ガスeを供給しながら、酸化シリコン膜22aに、エキシマレーザ光、自由電子レー

ザ光、放射光等の可干渉光L3、L4を2方向から互いに角度 $\theta_1$ をなすように照射して干渉縞を形成するとともに、上記干渉縞と角度 $\theta_3$ (図示せず)をなすような干渉縞を同様の可干渉光を2方向から角度 $\theta_2$ (図示せず)をなすように照射して形成し、酸化シリコン膜22aに発光波長に対応する酸化シリコン中での空間波長の間隔の互いに交わる格子状の干渉縞を形成する。それにより、互いに交わる干渉縞の交点の強度ピーク位置の酸化シリコン膜22aが光励起によりエッチングされ、酸化シリコン中での発光波長と等しい空間波長の周期d1、d2で酸化シリコン膜22aに数nm〜数百nmの大きさの複数の孔23がマトリクス状に形成される。

【0051】さらに、図4(c)に示すように、Siの水素化物のガス、Cの水素化物のガスおよびGeの水素化物のガスを含む堆積原料ガスgを供給しながら、図4(b)の工程と同様にして、酸化シリコン膜22aに、可干渉光L5、L6を2方向から互いに角度 $\theta_1$ をなすように照射するとともに、上記干渉縞と角度 $\theta_3$ をなすような干渉縞を可干渉光を2方向から互いに角度 $\theta_2$ をなすように照射して形成し、酸化シリコン膜22aに形成された孔23に一致するように互いに角度 $\theta_3$ をなす格子状の干渉縞を形成する。それにより、酸化シリコン膜22aの孔23内に光励起CVDにより厚さサブnm〜数nmのSi-C-Geドット24が堆積する。このようにして、酸化シリコン膜22aに複数のSi-C-Geドット24が2次元周期的に格子状に形成される。ここで、サブnmは、0、数nmである。

【0052】次に、図5(d)に示すように、酸化シリコン膜22a上に膜厚数百nmのSi層25を形成し、Si層25上に熱酸化法、CVD法、スパッタリング法等により膜厚数十nmの酸化シリコン膜22bを形成する。

【0053】さらに、図5(e)に示すように、図4(b)、(c)の工程と同様にして、酸化シリコン膜22bに複数の孔23を2次元周期的に形成し、複数の孔23内に膜厚サブnm〜数nmのSi-C-Geドット24を形成する。

【0054】同様にして、図6(f)に示すように、酸化シリコン膜22b上に膜厚数百nmのSi層26および膜厚数十nmの酸化シリコン膜22cを順に形成し、酸化シリコン膜22cに複数の孔23を2次元周期的に形成し、複数の孔23内に膜厚サブnm〜数nmのSi-C-Geドット24を形成する。

【0055】この場合、複数の酸化シリコン膜22a、22b、22c中のSi-C-Geドット24の上下方向の配列周期d3が酸化シリコン膜22a、22b、22cおよびSi層25、26による多層膜中での発光波長と等しくなるように酸化シリコン膜22a、22b、22cおよびSi層25、26の膜厚を設定する。このようにして、複数のSi-C-Geドット24が3次元

周期的に配列され、3次元のフォトニック結晶が構成される。

【0056】次に、図6(g)に示すように、酸化シリコン膜22c上に膜厚数百nmのSi層27を形成した後、Si層27上に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al、酸化インジウム・スズ等からなる電極28を形成するとともに、Si基板21の下面に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al、酸化インジウム・スズ等からなる電極29を形成する。

【0057】本実施例の半導体レーザ素子において、電極28、29からSi基板21およびSi層25、26、27に電流を注入すると、複数のSi-C-Geドット24に電子・正孔キャリアが注入される。各Si-C-Geドット24は数nmの大きさを有するので、量子効果による量子準位あるいは界面準位が形成され、量子準位あるいは界面準位間での注入キャリアの遷移により光が放出される。また、複数のSi-C-Geドット24が周期的に配列されているので、複数のSi-C-Geドット24の配列周期と等しい波長で選択的に発光の効率が上がりかつレーザ発振が行われる。

【0058】なお、本実施例の半導体レーザ素子においても、互いに直交する3方向にレーザ光が射出するが、3方向のうち1方向または2方向におけるSi-C-Geドット24の配列周期をずらせることにより、1方向または2方向のみレーザ光を射出させることができる。

【0059】また、図4～図6の例では、Si-C-Geドット24を含む酸化シリコン膜22a、22b、22cを上下方向に3層に積層しているが、積層の数はこれに限定されない。上下方向においても発光の位相を十分に揃えるためには、上下方向の積層の数を5～10以上にすることが好ましい。

【0060】Si-C-Geドット24を含む酸化シリコン膜22aを1層のみ設けた場合には、その酸化シリコン膜22aの表面に平行な方向にレーザ光が射出される。

【0061】図7、図8および図9は本発明の第3の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0062】まず、図7(a)に示すように、Si基板31上に、熱酸化法、CVD法、スパッタリング法等により膜厚数十nmの酸化シリコン膜32aを形成する。

【0063】次に、図7(b)に示すように、酸化シリコン膜32aに、10keVで加速されたGa(ガリウム)イオンからなる集束イオンビームb1を数nm～数百nmの直径に絞って酸化シリコン膜32aに照射するとともに、ガスノズル50からハロゲン系ガス等のエッチング性ガスg1を集束イオンビームb1と同じ箇所

数十nm～数百nmの孔33を形成する。この操作を順次繰り返すことにより、酸化シリコン膜32aに複数の孔33を発光波長に対応する酸化シリコン中での空間波長の周期d1、d2でマトリクス状に形成する。

【0064】その後、図7(c)に示すように、酸化シリコン膜32aに形成された各孔33に10keVで加速されたGaイオンからなる集束イオンビームb2を照射するとともに、ガスノズル51からSiの水素化物のガス、Cの水素化物のガスおよびGeの水素化物のガスを含む堆積原料ガスg2を照射し、各孔33内にイオン誘起により膜厚サブnm～数nmのSi-C-Geドット34をエピタキシャル成長させる。このようにして、酸化シリコン膜32aに複数のSi-C-Geドット34が2次元周期的に格子状に形成される。

【0065】次に、図8(d)に示すように、酸化シリコン膜32a上に膜厚数百nmのSi層35を形成し、Si層35上に熱酸化法、CVD法、スパッタリング法等により膜厚数十nmの酸化シリコン膜32bを形成する。

【0066】さらに、図8(e)に示すように、図7(b)、(c)の工程と同様にして、酸化シリコン膜32bに複数の孔33を2次元周期的に形成し、各孔33内に膜厚サブnm～数nmのSi-C-Geドット34を形成する。

【0067】次に、図9(f)に示すように、酸化シリコン膜32b上に膜厚数百nmのSi層36および膜厚数十nmの酸化シリコン膜32cを順に形成し、図7(b)、(c)の工程と同様にして、酸化シリコン膜32cに複数の孔33を2次元周期的に形成し、各孔33内に膜厚サブnm～数nmのSi-C-Geドット34を形成する。

【0068】この場合、複数の酸化シリコン膜32a、32b、32c中のSi-C-Geドット34の上下方向の配列周期d4が酸化シリコン膜32a、32b、32cおよびSi層35、36による多層膜中での発光波長と等しくなるように酸化シリコン膜32a、32b、32cおよびSi層35、36の膜厚を設定する。このようにして、複数のSi-C-Geドット34が3次元周期的に配列され、3次元のフォトニック結晶が構成される。

【0069】次に、図9(g)に示すように、酸化シリコン膜32c上に膜厚数百nmのSi層37を形成した後、Si層37上に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al、酸化インジウム・スズ等からなる電極38を形成するとともに、Si基板31の下面に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al等からなる電極39を形成する。

【0070】本実施例の半導体レーザ素子において、電極38、39からSi基板31およびSi層35、36、37に電流を注入すると、複数のSi-C-Geド

10

20

30

40

50

ット34にキャリアが注入される。各Si-C-Geドット34は数nmの大きさを有するので、量子効果により量子準位あるいは界面準位が形成され、量子準位あるいは界面準位間での注入キャリアの遷移により光が放出される。また、Si-C-Geドット34が周期的に配列されているので、複数のSi-C-Geドット34の配列周期と等しい波長でのみ選択的に発光の効率が上がりかつレーザ発振が行われる。

【0071】なお、本実施例の半導体レーザ素子においても、互いに直交する3方向にレーザ光が射出するが、3方向のうち1方向または2方向におけるSi-C-Geドット34の配列周期をずらせることにより、1方向または2方向にのみレーザ光を射出させることができる。

【0072】また、図7～図9の例では、Si-C-Geドット34を含む酸化シリコン膜32a、32b、32cを上下方向に3層に積層しているが、積層の数はこれに限定されない。上下方向においても発光の位相を十分に揃えるためには、上下方向の積層の数を5～10以上にすることが好ましい。

【0073】Si-C-Geドット34を含む酸化シリコン膜32aを1層のみ設けた場合には、その酸化シリコン膜32aの表面に平行な方向にレーザ光が射出される。

【0074】図10および図11は本発明の第4の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0075】まず、図10(a)に示すように、Si基板41上に、熱酸化法、CVD法、スパッタリング法等により膜厚数十nmの酸化シリコン膜42aを形成す

る。

【0076】次に、図10(b)に示すように、酸化シリコン膜42aに、集束イオンビーム43によりSi、CまたはGeを注入し、注入部43を形成する。注入部43の位置は、フォトニック結晶を構成する格子点であり、注入深さは、酸化シリコン膜42a厚さの半分の深さ付近である。Geイオンの場合の注入エネルギーは、十数～数十keVであり、注入量は、 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ である。

【0077】その後、図10(c)に示すように、加熱処理により酸化シリコン膜42aの注入部43の原子を析出させ、数nm～数十nmの大きさの半導体ドット44を周期的に形成する。Siの場合の加熱温度は、1000～1400℃である。

【0078】次に、図11(d)に示すように、酸化シリコン膜42a上に膜厚数百nmのSi層45を形成した後、図10(a)、(b)、(c)の工程と同様に、Si層45上に酸化シリコン膜42b、Si層46および酸化シリコン膜42cを順に形成するとともに、複数の酸化シリコン膜42a、42b、42c中に半導

体ドット44を周期的に形成する。

【0079】この場合、複数の酸化シリコン膜42a、42b、42c中の半導体ドット44の上下方向の配列周期d5が酸化シリコン膜42a、42b、42cおよびSi層45、46による多層膜中での発光波長と等しくなるように酸化シリコン膜42a、42b、42cおよびSi層45、46の膜厚を設定する。このようにして、複数の半導体ドット44が3次元周期的に配列され、3次元のフォトニック結晶が構成される。

【0080】次に、図11(e)に示すように、酸化シリコン膜42c上に膜厚数百nmのSi層47を形成した後、Si層47上に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al、酸化インジウム・スズ等からなる電極48を形成するとともに、Si基板41の下面に、蒸着法、スパッタリング法、メッキ法等によりAu、Al等からなる電極49を形成する。

【0081】上記では、Geの集束イオンビームを用い、Geドットを周期的に配列しているが、上記のGeの代わりに、Si、Cあるいはそれらを組合せてSi、SiCまたはSi-C-Geドットを周期的に配列してもよい。

【0082】本実施例の半導体レーザ素子において、電極48、49からSi基板41およびSi層45、46、47に電流を注入すると、複数の半導体ドット44にキャリアが注入される。各半導体ドット44は数nmの大きさを有するので、量子効果により量子準位あるいは界面準位が形成され、量子準位あるいは界面準位間での注入キャリアの遷移により光が放出される。また、半導体ドット44が周期的に配列されているので、複数の半導体ドット44の配列周期と等しい波長でのみ選択的に発光の効率が上がりかつレーザ発振が行われる。

【0083】なお、本実施例の半導体レーザ素子においても、互いに直交する3方向にレーザ光が射出するが、3方向のうち1方向または2方向における半導体ドット44の配列周期をずらせることにより、1方向または2方向にのみレーザ光を射出させることができる。

【0084】また、図10および図11の例では、半導体ドット44を含む酸化シリコン膜42a、42b、42cを上下方向に3層に積層しているが、積層の数はこれに限定されない。上下方向においても発光の位相を十分に揃えるためには、上下方向の積層の数を5～10以上にすることが好ましい。

【0085】半導体ドット44を含む酸化シリコン膜42aを1層のみ設けた場合には、その酸化シリコン膜42aの表面に平行な方向にレーザ光が射出される。

【0086】上記のように、第1、第2、第3および第4の実施例の半導体レーザ素子では、Si系の間接遷移型半導体材料を用いることによりレーザ発振が可能となる。したがって、半導体レーザ素子をSiからなる集積回路に集積化することができる。また、周期構造による

発光体内での選択則を用いることにより特定の波長での光の誘起・反射が行われているので、発光効率が向上し、また、反射鏡が不要となる。したがって、半導体レーザ素子の設計の自由度が増すとともに、反射面の劣化による素子特性の劣化を防止することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る半導体発光素子の一例を示す模式的縦断面図、模式的横断面図および半導体ドットの模式的断面図である。

【図2】本発明の第1の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図3】本発明の第1の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図4】本発明の第2の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図5】本発明の第2の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図6】本発明の第2の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図7】本発明の第3の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

\*

\*【図8】本発明の第3の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図9】本発明の第3の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

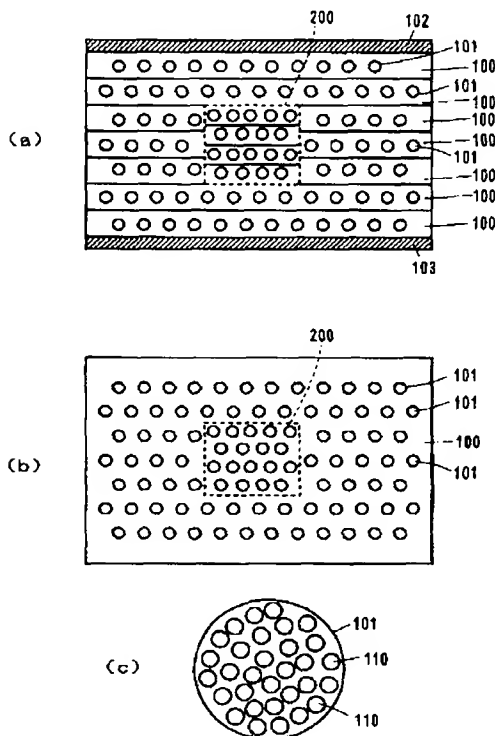
【図10】本発明の第4の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図11】本発明の第4の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

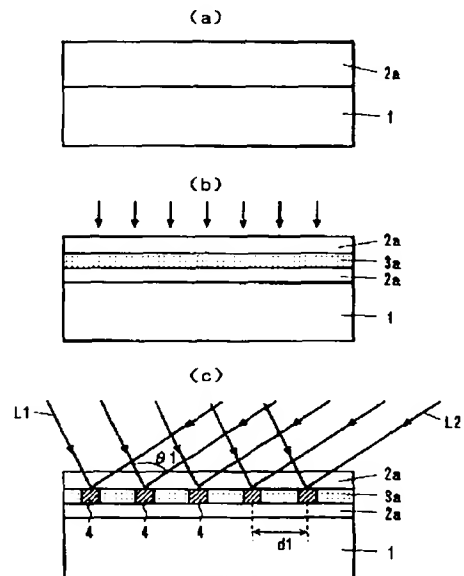
【符号の説明】

- 1, 21, 31, 41 Si基板
- 2a, 2b, 2c 酸化シリコン層
- 3a, 3b, 3c Ge過飽和層
- 4 Geドット
- 4b, 4c 透明電極層
- 5, 6, 28, 29, 38, 39, 48, 49 電極
- 22a, 22b, 22c, 32a, 32b, 32c, 42a, 42b, 42c 酸化シリコン膜
- 23, 33 孔
- 24, 34 Si-C-Geドット
- 44 半導体ドット

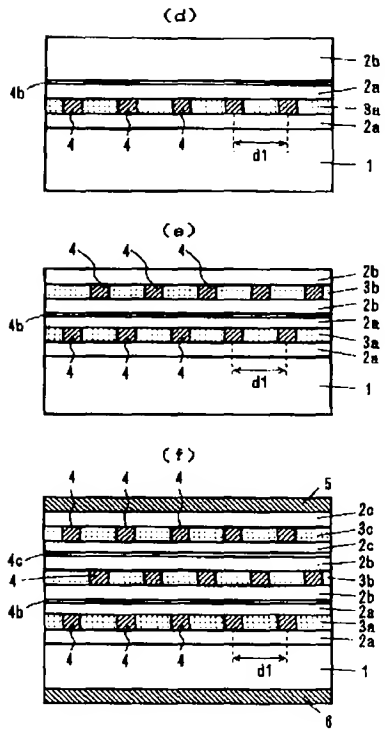
【図1】



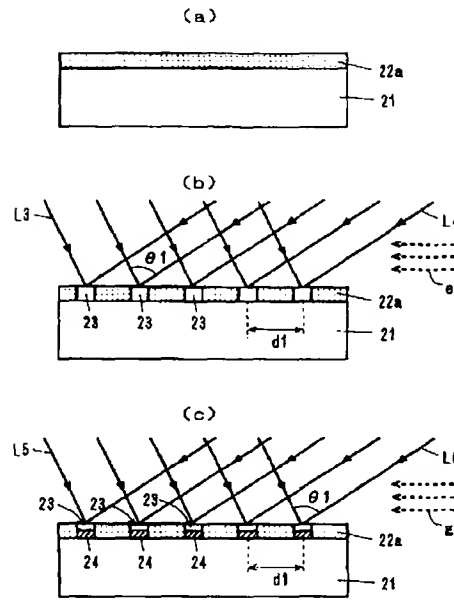
【図2】



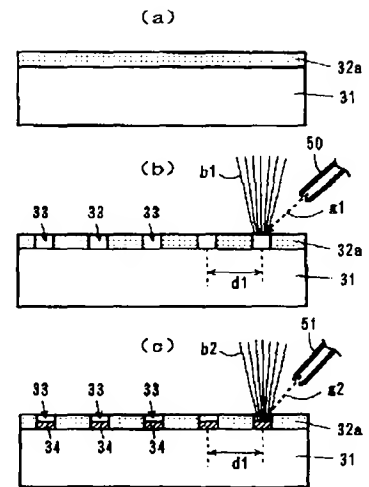
【図 3】



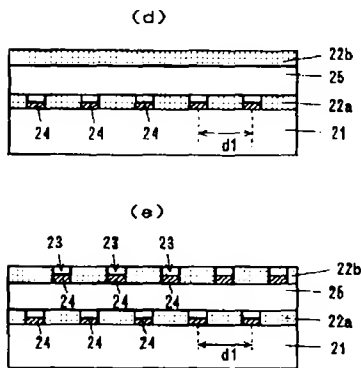
【図 4】



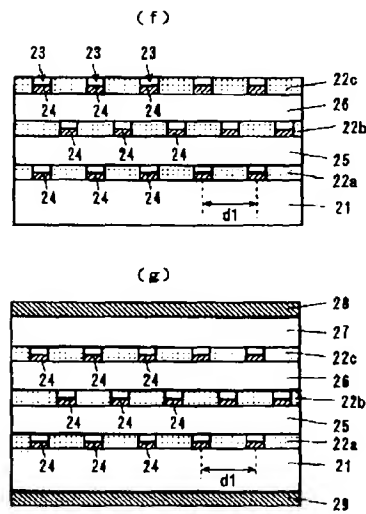
【図 7】



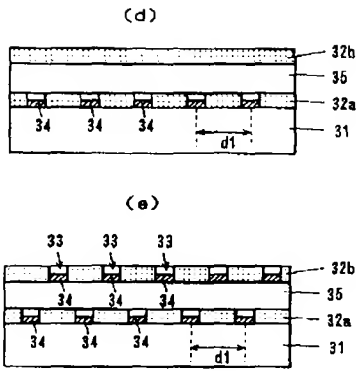
【図 5】



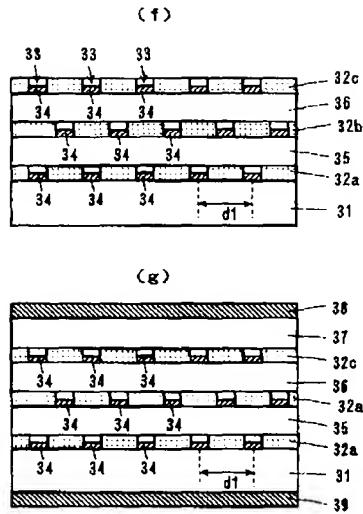
【図 6】



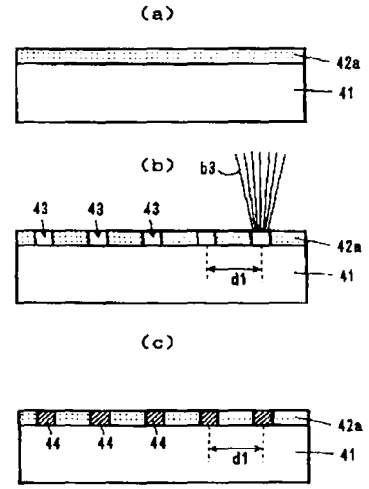
【図8】



【図9】



【図10】



【図11】

